



## El potencial de riesgo sísmico en el noreste de México y sus implicaciones en la zona metropolitana de Monterrey, N. L.

JUAN CARLOS MONTALVO ARRIETA\*



La generación de grandes terremotos en el interior de los continentes o las regiones tectónicamente estables es rara comparada con aquellos sismos que se originan en áreas de límites de placas. Sin embargo, estos terremotos ocasionales pueden ser extremadamente devastadores, debido a que las ciudades ubicadas en el interior de los continentes se edifican sin tomar en cuenta criterios de diseño sísmico. Algunos autores<sup>1</sup> mencionan que los principales terremotos intraplaca han causado considerable daño en zonas urbanas, debido a que la atenuación que experimenta la energía sísmica es relativamente baja en el interior de los continentes. Ejemplos de importantes terremotos intraplaca son los de Killari (Latur) de 1994, en la India ( $M_w = 6.2$ )<sup>2</sup>; Bhuj (Gujarat) de 2001, también en la India ( $M_w = 7.7$ ) y los sismos de 1811 y 1812 en el área de Nuevo Madrid, Missouri, en la parte central de Estados Unidos de América, para los cuales se ha estimado una magnitud igual o superior a 8. Para el noreste (NE)

de México y la región fronteriza con EE.UU., los principales terremotos históricos son: Bavispe, Sonora, en 1887 ( $M_w = 7.4$ )<sup>3</sup>; Parral, Chihuahua ( $M_w = 6.5$ )<sup>4</sup>; Valentine, Texas, en 1931 ( $M_w = 6.4$ )<sup>5</sup>; Alpine, Texas, en 1995 ( $M_w = 5.7$ ).<sup>6</sup> Aunque sólo 5% de la energía sísmica global es liberada en el interior de los continentes,<sup>1, 7</sup> el impacto generado a la humanidad por estos terremotos justifica la aplicación grandes esfuerzos para entender y estudiar el riesgo sísmico en estas regiones.

El NE de México se ha considerado, generalmente, como una región tectónica estable, caracterizada por una baja sismicidad y por una ausencia de registros de movimientos fuertes del suelo. Sin embargo, se ha determinado que en la región central y el este de EE.UU. existe el potencial para generar sismos con magnitudes máximas de 7.0 a 7.5.<sup>8</sup> La figura 1 muestra la distribución de máximas magnitudes propuestas para esta porción de los EE.UU. Por otro lado, algunos autores<sup>8</sup> han formulado que para la zona fronteriza entre Texas y Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas se pueden esperar magnitudes máximas de 7.5.

Las preguntas que surgen aquí son: ¿cuál es el nivel de sismicidad en la región?, ¿cuáles son las máximas magnitudes esperadas para el NE de

□ El presente artículo está basado en la investigación "El potencial de riesgo sísmico en el noreste de México y sus implicaciones en la zona metropolitana de Monterrey, N. L.", galardonada con el Premio de Investigación UANL 2009 en la categoría de Ciencias de la Tierra, otorgado en sesión solemne del Consejo Universitario, en septiembre de 2009.

\* Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL.

México?, ¿dónde se puede concentrar o esperar esta sismicidad? Es por esto que el objetivo de este trabajo es estudiar la sismicidad histórica y la predicción del movimiento del suelo para el NE de México y sus implicaciones en estudios de riesgo sísmico. Para llevar a cabo esto, en este trabajo se revisaron: a) la sismicidad histórica y actual para la región comprendida entre 24–31°N, 97–106°W, que incluye parcialmente los estados Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas en México y sur de Texas, en EE.UU.; b) se estimó el movimiento del suelo, a partir de ecuaciones de atenuación y sus implicaciones en el riesgo sísmico-geológico en la región metropolitana de Monterrey, N.L, para un sismo postulado en la Falla San Marcos, en la parte central de Coahuila.

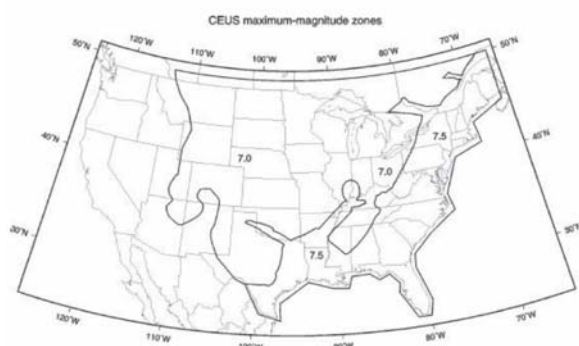


Fig. 1. Magnitudes máximas esperadas para sismos en la región central y este de EE.UU.<sup>8</sup>

## Marco tectónico

El área de estudio se localiza dentro de tres provincias geológicas: i) Cuencas y Cordilleras y la región del *rift* del Río Grande; ii) Sierra Madre Oriental; iii) Planicie Costera del Golfo. Estas provincias están cortadas por tres grandes lineamientos y fallas con rumbo N-NW que han sido postuladas e identificadas para el NE de México (figura 2): Falla La Babia,<sup>9</sup> la cual cruza el norte de Coahuila; Falla San Marcos, localizada en la parte central Coahuila; y la Mojave-Sonora megashear.<sup>10–12</sup> Se ha propuesto<sup>11–13</sup> que los sistemas de fallas antes definidos (La Babia y San Marcos) han tenido varios periodos de reactivación.

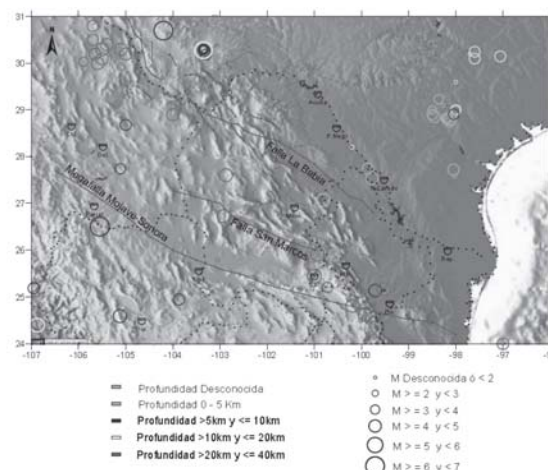


Fig. 2. Sismicidad histórica en el noreste de México y el sur de Texas (1928-2006), y principales lineamientos y fallas que han sido identificados o postulados en esta región. M representa la magnitud local. Se muestran algunas ciudades [Chi: Chihuahua; Del: Delicias; Dur: Durango; Tor: Torreón; Mon: Monclova; Sal: Saltillo; Mty: Monterrey; Lin: Linares; P. Neg: Piedras Negras; Rey: Reynosa (tomado de Galván-Ramírez y Montalvo-Arrieta, 2008)].

En la falla San Marcos se encontraron evidencias de movimiento durante el Jurásico, Cretácico Temprano y Terciario.<sup>11,14</sup> El último periodo de movimiento del cual se han documentado evidencias de reactivación es el Plioceno Tardío-Cuaternario, mediante desplazamientos de fallas de tipo normal, en el límite de los estados de Chihuahua-Coahuila.<sup>15</sup>

Por otro lado, la dirección del esfuerzo máximo horizontal ( $S_H$ ) en los estados de Coahuila y Nuevo León, en el área del cinturón plegado Laramide en Coahuila,<sup>16</sup> se ha encontrado que es paralela a las fallas cuaternarias y el *rift* del Río Grande, en el oeste de Texas y noreste de Chihuahua. Esta similitud sugiere un campo de esfuerzos con dirección  $S_V > S_{NNW} > S_{ENE}$ . Por otro lado, a partir de mediciones continuas de GPS<sup>17</sup> en las estaciones localizadas en Chihuahua, Tampico y Monterrey, se han observado variaciones en los desplazamientos residuales entre 1.4 y 3.0 mm/año con dirección hacia el sureste, siguiendo el patrón actual de extensión de la provincia Cuencas y Cordilleras. La documentación hecha mues-

tra que aunque durante mucho tiempo se ha pensado que el NE de México es una zona tectónicamente pasiva, estas nuevas aportaciones en diferentes campos de las ciencias de la tierra dan evidencia de algún tipo de dinámica de deformación para esta región relacionada con los procesos extensionales observados en la provincia Cuencas y Cordilleras.

## Fuente de datos

Estudios recientes han recopilado la historia sísmica del NE de México,<sup>18,19</sup> donde se ha encontrado evidencia desde 1787. Para el periodo de estudio (1787-2008) se encontraron 150 eventos en el rango  $2.4 \leq M \leq 6.5$ . El reporte más antiguo (marzo 26 de 1787) corresponde a un evento sísmico sentido en Durango y Real del Oro, la crónica dice: *Durango, Dgo.: Tembló en Durango con ruidos subterráneos; Real del Oro, Dgo.: El terremoto fue fuerte y se sintió con tanto estrépito en las cavidades de las minas, que al parecer se desplomaban todos los techos de las casas.*

Para la región comprendida entre Monterrey y Saltillo, la evidencia de mayor interés corresponde al 28 de abril de 1841,<sup>19</sup> se encontró esto: «Saltillo, Punta Santa Elena, Coah.: Departamento de Coahuila. Saltillo, mayo 1° de 1841. En la noche estando la atmósfera serena, limpia y despejada de vapores, viento por nornoreste y la temperatura extraordinariamente caliente, a las 8 y 45 minutos se dejó sentir en toda la ciudad un ruido subterráneo con detonaciones prolongadas, semejantes a las que algunas veces produce la electricidad inflamada, mezcladas con las que podría originarse por carros muy pesados si se arrastran con violencia sobre pavimentos, bajo de las cuales hubiera bóvedas; tal fenómeno fue seguido sin perceptible intermisión por movimientos repetidos de oscilación y trepidación que duraron de 4 a 5 segundos. El pavoroso ruido se oyó con variedad, según las diversas corrientes de aire que pudieron comunicarlo, mas en lo general se percibió así como los mortales movimientos que produjo de sur a norte. A las 9 y 56 minutos, a las 12 y 50 minutos, y a la una y 11 minutos del día 28, se repitieron

pequeñas oscilaciones que fueron observadas en particular y no en general. A las 3 de la mañana del mismo día 29, sopló recio el norte, los horizontes se cubrieron con densos vapores, o como vulgarmente se dice con calma, y la temperatura refrescó con exceso; de modo, que todo el referido día 20 del mes sobre que ya pasó el tiempo, se hicieron sentir los aires fríos y constipantes que en noviembre son precursores del invierno. Damos gracias a Dios Nuestro Señor que no hayan sufrido daño alguno ni las fábricas ni los habitantes de esta ciudad, a la vez que en la hacienda de los Muertos, distante 10 leguas al noroeste, cayó una casa; en la de los Patos, distante 17 leguas por el viento, al sur oeste, se repitieron los temblores en la noche del 28 y mañana del 29 hasta trece veces, en la de la Vaquera distante 11 leguas al sur suroeste, se cuarteó la casa grande cayendo parte de dos menores; y en la punta Santa Elena distante 21 leguas hacia el dicho último rumbo, una noria se hundió y otra se insolvió [sic], la casa grande se arruinó quitando la vida a seis personas, entre ellas la mujer del caporal, y la caída de otra casa en que acertó estar alojada la escolta de caudales que de Zacatecas se dirige para el cuerpo del ejército del norte, vino a tierra, estropeando malamente al alférez del tercer regimiento de caballería permanente D. Félix Blanco, a 3 dragones del regimiento activo de Querétaro, y sepultando entre sus escombros las armas y monturas; cuya noticia dada por el comandante de la patria D. Ignacio García le llegó al Sr. Comandante General de este departamento a las ocho y media de la noche del día 29, y a las nueve mandó su Señoría en auxilio de la enunciada escolta de caudales, al teniente D. Benito Cortés con 20 infantes del duodécimo regimiento de infantería permanente. ¿Qué habrá sido de los habitantes, dignos por mil títulos, donde fue el centro del terremoto cuyos tristes efectos se han dejado sentir como nunca hasta ahora?

Victoria, Tamaulipas; Saltillo, Coahuila.

«Por cartas de la Marina sabemos no sin asombro, que allí [Victoria] fue sentido [...] a las ocho y media de la noche, el mismo que en San Luis se advirtió y con más impulso en el Saltillo, donde las detonaciones fueron más espantosas. Iremos sabiendo los estragos que ocasionó en estos lugares. Por fortuna nuestra, esta ciudad permaneció inmovible, y no es menor de sus goces el de disfrutarlo.

*Este fenómeno no conocido hasta ahora en Tamaulipas propende a imaginar, que la explosión eléctrica ha sido en el mar de oriente, o sea seno de México, porque un fuerte olor azufrado de que se hace relación, nos revela qué inmediato está el motor.*

## Distribución de la sismicidad

### Sismicidad de la porción este de Chihuahua, oeste de Coahuila y suroeste de Texas

La región de Chihuahua y el oeste de Coahuila, así como el suroeste de Texas, se localizan en lo que se conoce como las provincias de Cuencas y Cordilleras, y Río Grande *rift*. Esta zona se caracteriza por una tectónica del tipo extensional activa. Aunque existe evidencia de fallas de la edad Cuaternaria en esta amplia región, sólo tres terremotos de  $M_w > 5.7$  han ocurrido (figura 2). La ausencia de datos sísmicos se explica por la pobre cobertura de redes sísmicas en la región y a los largos periodos de recurrencia de sismos de magnitud intermedia a grande, el cual varía de 10 a 100 milenios.<sup>16</sup> La región de Chihuahua, localizada en la parte sur de la provincia de Cuencas y Cordilleras, se caracteriza por la presencia de un amplio fallamiento normal.<sup>4</sup> El terremoto de Parral ( $M_w = 6.5$ ) de 1928 es el más importante ocurrido en la región.<sup>4</sup> En este trabajo se encontraron 67 eventos para el periodo 1847–2008.

Para la zona fronteriza México-EE.UU., que comprende la región de Trans Pecos en Texas, se han documentado dos sismos de magnitud moderada: el terremoto de Valentine, Texas, del 16 de agosto de 1931<sup>5</sup> ( $M_w = 6.4$ ), y el de Alpine, Texas, del 14 de abril de 1995<sup>6</sup> ( $M_w = 5.7$ ). Estos dos eventos sísmicos generaron numerosas réplicas.<sup>5,6</sup> Para el sismo de Valentine aún no hay un consenso de cuál falla fue la responsable de la liberación de la energía sísmica; sin embargo, se propone<sup>5,13</sup> como fuente a la Falla Mayfield. Además, para esta falla se han documentado recurrentes desplazamientos.<sup>6</sup>

El terremoto de Alpine, Texas, se generó cerca del límite de la cuenca del oeste de Texas y el levantamiento del cinturón Marathon. Al igual que para el sismo de Valentine, tampoco existe un consenso de cuál fue la falla responsable; sin embargo, se ha mencionado que algunos de los rasgos geológicos presentes en esta zona podrían ser capaces de generar el terremoto.<sup>6</sup>

Las características estructurales de la zona fronteriza México-EE.UU. están relacionadas con la presencia de fallas del Terciario al Cuaternario, cuyas orientaciones son N–NW y corren paralelas al *rift* del Río Grande, con una extensión de aproximadamente 100 km. Estos sistemas de fallas se prolongan desde el Paso, Texas, hasta la parte norte de Coahuila.<sup>13</sup> Algunos de estos sistemas de fallas muestran evidencia de movimientos frecuentes durante el Cuaternario, y su descripción detallada está disponible en el sitio *web* de la base de datos de fallas del Cuaternario<sup>20,21</sup> por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). A partir de la búsqueda en los catálogos, para la porción central del estado de Coahuila se reportaron tres eventos, los cuales podrían definir el límite sureste de la región de Trans Pecos (figura 2). De acuerdo a los mapas de riesgo sísmico generados por el USGS,<sup>8</sup> para esta región se reportan valores aproximados de 12 a 14% de la aceleración pico del movimiento del suelo [PGA, por sus siglas en inglés; % de  $g$  ( $\text{cm/s}^2$ ), con 2% de probabilidad de excedencia en 50 años]. Por otro lado, algunos autores<sup>5</sup> mencionan que la deformación sísmica observada en el oeste de Texas es capaz de generar terremotos en el rango de magnitudes entre 6.4–7.5; mientras que otros estudios<sup>8</sup> consideran que las magnitudes máximas esperadas para Texas son de 7.0 a 7.5 (figura 1). Por lo que es importante evaluar el riesgo sísmico asociado con estas fallas Cuaternarias localizadas en el oeste de Texas, noreste de México y la franja fronteriza México-EE.UU., y su potencial de daño a las zonas urbanas de esta región.



### Sismicidad de las provincias Sierra Madre Oriental y Planicie Costera del Golfo Norte

La Sierra Madre Oriental está compuesta por una secuencia de rocas calcáreas y clásticas de las edades del Jurásico Tardío al Cretácico, plegadas y cabalgadas durante la orogenia Laramide.<sup>22-26</sup> Las rocas prejurásicas incluyen gneises greenvillianos, rocas metasedimentarias del Paleozoico, metabasitas y sedimentos tipo flysch del Pérmico Temprano.<sup>2,26-28</sup> Hacia el este de esta provincia se extiende la Planicie Costera del Golfo, donde se localiza la Cuenca de Burgos, la cual está definida como una secuencia de sedimentos clásticos depositados en una cuenca profunda y estructuralmente caracterizada por una tectónica del tipo extensional.<sup>9</sup> En la actualidad, se estima que existen en el área de la Cuenca de Burgos más de 4000 pozos perforados sobre secuencias marinas y no marinas del Terciario, con la finalidad de extraer gas en cualquiera de sus variedades, almacenado en horizontes de arenas.

Esta región se ha caracterizado por niveles bajos de sismicidad. Para esta región se reportan 17 eventos con magnitudes < 5.0.<sup>18</sup> Sin embargo, hay otros eventos que se han identificado a través de la sacudida del movimiento del suelo que experimentaron los pobladores. Esta información ha sido documentada,<sup>19</sup> y las ciudades donde se identificaron 20 terremotos históricos (periodo: 1455-1913) son: Saltillo, Linares, Monterrey, Cd. Victoria, Villagrán, Montemorelos, La Concepción, Mier y Noriega, Dr. Arroyo y Villa de Santiago, localizadas en los límites de la Sierra Madre Oriental. De estos eventos históricos, el terremoto del 28 de abril de 1841 causó daños y muertes cerca del área de Saltillo, Coah. (Sal; figura 2), y fue sentido en un radio de aproximadamente 400 km. De acuerdo a los mapas de riesgo sísmico generados por el USGS,<sup>8</sup> para el área de Saltillo se estiman valores aproximados de 12 PGA. Estos valores contrastan con valores menores estimados para áreas adyacentes.

La figura 2 muestra las localizaciones epicentrales y las trazas de los principales lineamientos y fallas identificados o postulados para el NE de México: Falla La Babia, Falla San Marcos y la Sonora Mojave *megashear*. De acuerdo con la figura, algunos sismos se ubican sobre o cerca de estas fallas, como en el caso de la Falla San Marcos. Recientemente se ha encontrado la evidencia<sup>15</sup> de que esta falla podría haber sido reactivada (a través de fallamiento normal) durante el Plioceno Tardío- Cuaternario en la región limítrofe de los estados de Chihuahua -Coahuila, por lo que la sismicidad encontrada cerca de la Falla San Marcos podría estar relacionada con los procesos de reactivación propuestos por algunos autores.<sup>15</sup> De acuerdo con los catálogos sísmicos analizados, las localizaciones epicentrales pueden tener un error en su localización de aproximadamente 10 km. Sin embargo, para algunos sitios existe una buena correlación entre la localización de los epicentros con los mapas de riesgo sísmico del USGS,<sup>8</sup> tal como los eventos definidos para el área de Saltillo y la porción central de Coahuila (figura 2).

Para el área de Linares, N.L. (Lin; figura 2) existe evidencia histórica<sup>19</sup> y reciente de actividad sísmica. Después del sismo del 4 de abril de 2004 ( $M = 3.9$ ), cuyo epicentro se ubicó cerca de la ciudad de Montemorelos, se reportaron cuarteadoras a casas habitación. Este pequeño evento fue sentido además en Allende, Hualahuises y General Terán, N.L. Hasta 2005, la ausencia de redes sísmicas en el NE de México limitaba la determinación adecuada de la localización, magnitud y mecanismo focal de los terremotos. Esta información es clave para la interpretación tectónica en el área y su relación con el potencial de daño a los centros urbanos de la región.

En 2006 se inicia un parteaguas en el estudio de la sismicidad del NE de México, debido a que en enero de ese año se instala la primera estación sísmica digital de banda ancha para esta región (LNIG), la cual fue instalada en terrenos de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la UANL,<sup>30</sup> en

colaboración con el Servicio Sismológico Nacional (SSN, Instituto de Geofísica, UNAM).

Como resultado de la puesta en marcha de la estación LNIG, el 17 de abril del 2006 se registraron de manera digital dos sismos ocurridos en el área de estudio. De acuerdo con el SSN, se localizaron al suroeste de la ciudad de Santiago, N.L. (figura 3), y cuyas magnitudes fueron de 4.3 y 4.1. Al sismo principal se le ha denominado el temblor de Santiago. La figura 4 muestra las series de tiempo de aceleración del evento principal ( $M =$

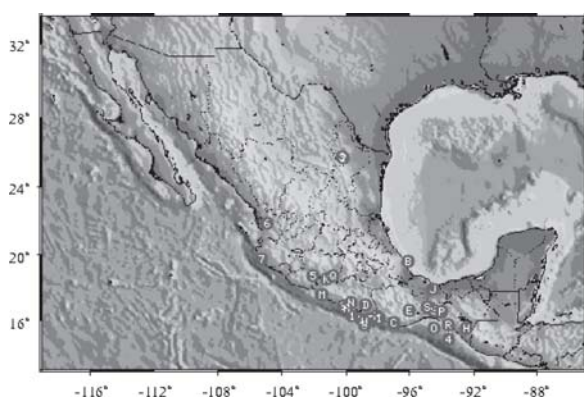


Fig. 3. Localización de los sismos de Santiago del 17 de abril de 2006 ( $M_L = 4.3$  y  $4.1$ ), y distribución de sismicidad para la república mexicana para el periodo 09/04/2006 al 18/04/2006 (tomado del Servicio Sismológico Nacional).

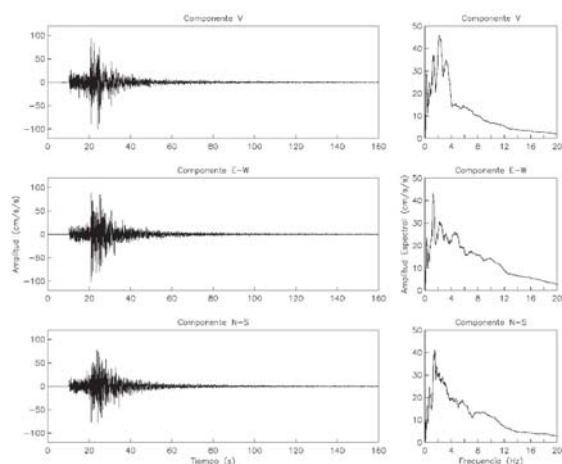


Fig. 4. Acelerogramas (columna izquierda) del sismo de Santiago, N.L., del 17 de abril de 2006 ( $M_L = 4.3$ ) registrado en la estación LNIG (Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL) y sus respectivos espectros de amplitud de Fourier (columna derecha).

4.3) registradas en la estación LNIG y sus respectivos espectros de amplitud de Fourier. A partir de una base de datos confiable, se podrán hacer análisis del contenido energético de los sismos y sus implicaciones al riesgo sísmico para la región.

### Sismicidad de la porción sur central de Texas

La sismicidad reportada para esta región incluye del tipo natural e inducida. Los principales rasgos tectónicos en la parte central de Texas están dominados por una serie de sistemas de fallas que forman parte del llamado cinturón Ouachita, el cual se extiende desde el noreste de México, atraviesa la porción central de Texas, hasta Oklahoma y Arkansas. Para esta región ya se han llevado a cabo recopilaciones de la actividad sísmica,<sup>6</sup> en las cuales se han reportado dos sismos históricos sentidos en el área de Austin (5 de enero de 1887 y 9 de octubre de 1902). En la porción oriental del estado, hacia la Planicie Costera del Golfo (figura 2), la actividad de sismicidad registrada tiene como posible origen los ajustes de la carga litostática, producto de los procesos de sedimentación por la Planicie Costera del Golfo de México.<sup>6</sup>

### Sismicidad inducida

Además de la sismicidad de origen natural que se puede generar en esta región, existe otro tipo de eventos sísmicos que se pueden disparar a partir de la actividad humana, estos temblores se conocen como inducidos. Los reportes más recientes de este tipo de actividad (a partir de la extracción de aceite y gas) se ubican en la cuenca de Delaware, al oeste de Texas, y en la porción sur-central de Texas, donde se han ubicado 36 epicentros distribuidos dentro y alrededor de un campo de producción de aceite y gas.<sup>6,31-33</sup> Estos eventos relacionados con la extracción de fluidos tuvieron un rango de magnitudes menores a 4.5. Para el NE de México no hay evidencias documentadas de sismicidad inducida. Sin embargo, debido a la gran

actividad de pozos petroleros, aproximadamente 4,000 en la Cuenca de Burgos, Tamaulipas, hay posibilidades de que se puedan inducir sismos como resultado de la alteración del estado de esfuerzos en la cuenca.

## Predicción de movimientos fuertes del terreno

Una manera de estimar el movimiento del suelo en el interior de continentes, donde hay baja sismicidad y pocos registros disponibles de movimientos fuertes, es por medio de ecuaciones de atenuación sísmica basadas en la simulación numérica del movimiento del suelo, en lugar del registro de terremotos. En la actualidad existen diferentes ecuaciones de atenuación que han sido publicadas, las cuales varían de acuerdo a la base de datos generada en los registros de movimiento del suelo o por el método usado para la generación de éstas. En este trabajo se aplican las ecuaciones de predicción para estimar la aceleración pico del movimiento del suelo, para sitios en roca,<sup>34</sup> las cuales son válidas para las provincias Planicie Costera del Golfo y Cuencas y Cordilleras.

### Escenario de la distribución de PGA para un terremoto hipotético en la porción central del estado de Coahuila ( $M_w = 6.5$ )

En la bibliografía<sup>35</sup> se ha mencionado que el primer paso a considerar en un análisis de riesgo sísmico es la existencia de fuentes sismogénicas capaces de generar temblores de magnitud intermedia a grande ( $M \geq 5$ ) cercanos al área de estudio. Por otro lado, a partir de datos geológicos y sismológicos,<sup>36</sup> se ha demostrado que grandes terremotos pueden generarse en fallas preexistentes. En este trabajo se evalúa el escenario sísmico generado por un terremoto hipotético ubicado en la parte central del estado de Coahuila. Se ha elegido al segmento oeste de la Falla San Marcos como la zona de ruptura, debido a que (1) se ha pro-

puesto la Falla San Marcos que ha experimentado diversos periodos de reactivación a través del tiempo. La última en el Plioceno Tardío-Cuaternario;<sup>15</sup> (2) tres de las principales zonas urbanas del NE de México (Monterrey, Mty; Saltillo, Sal; Monclova, Monc; figuras 2 y 5) se localizan en un radio menor a 150 km de la fuente sísmica, estos centros urbanos concentran una población de aproximadamente 5'000,000 de habitantes. Por lo que este posible escenario puede identificarse como de alto riesgo para estas ciudades. El daño asociado a partir de este hipotético terremoto podría ser severo, debido a que la mayoría de las estructuras civiles se han construido sin tomar en cuenta criterios sísmicos.

La estimación de los valores de PGA se llevó a cabo a partir de la elección de una malla de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  para el área de estudio. En cada punto se calculó el valor de PGA para la magnitud y la distancia definida, a partir de esto se generaron los mapas de la distribución de los valores de PGA. La figura 5 muestra los valores de PGA para sitios en roca generados a partir del rompimiento de la Falla San Marcos. La configuración simétrica de las curvas de PGA se debe a que en este análisis no se consideran efectos de sitio. En la fuente, la configuración sigue la dimensión de la ruptura de la falla. Los valores de PGA estimados en Monte-

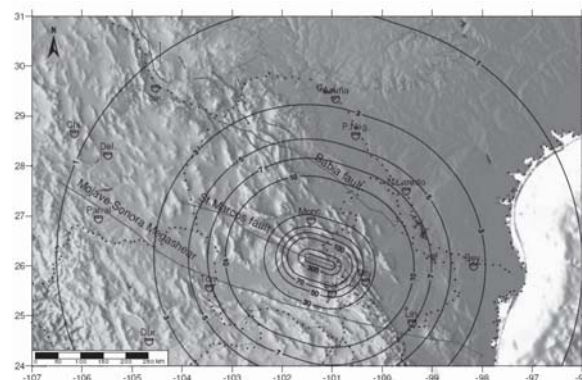


Fig. 5. Valores pico de aceleración del movimiento del suelo (PGA,  $\text{cm/s}^2$ ) obtenidos a partir de la ecuación de atenuación en sitios de roca,<sup>34</sup> para la ruptura de un sismo hipotético ( $M_w = 6.5$ ) en el segmento sureste de la falla San Marcos, localizada en la porción central del estado de Coahuila.

rey, Saltillo y Monclova varían entre 30 – 70 cm/s<sup>2</sup>. Para las ciudades de Linares (Lin), Nuevo Laredo/Laredo, Texas y Torreón (Tor) los valores de PGA se ubican entre 5 y 10 cm/s<sup>2</sup>. Este hipotético terremoto podría producir o disparar importantes deslizamientos y caídas de roca en la Sierra Madre Oriental, donde algunas ciudades del NE de México se encuentran ubicadas.

## Conclusiones

A partir de la compilación de la sismicidad histórica a través de catálogos sísmicos nacionales e internacionales, así como de reportes, se encontró que para la región de estudio existe la evidencia de actividad sísmica desde 1787, siendo el temblor del 28 de abril de 1841 el más dañino (en la zona cercana a Saltillo, Coahuila). Durante este sismo se reportaron daños a estructuras y el deceso de seis personas, en Punta Santa Elena, Coahuila. Sin embargo, es hasta 1847 cuando se tienen las primeras localizaciones de terremotos. La actividad sísmica se concentra principalmente en regiones con presencia de fallamiento activo (de la edad Plioceno Tardío-Cuaternario), por ejemplo, en la provincia de Cuencas y Cordilleras (Chihuahua - Coahuila) y la región de Trans Pecos (frontera México-EE.UU.), donde se han documentado los terremotos con mayores magnitudes (Parral, Chihuahua, de 1928, Mw = 6.5; Valentine, Texas de 1931, Mw = 6.4; Alpine, Texas de 1997; Mw = 5.7). Sin embargo, también existe sismicidad que pudiera estar asociada a las principales fallas y lineamientos postulados para el NE de México: las fallas La Babia, San Marcos y el lineamiento Sonora Mohave megashear. Para este último la actividad se concentra en la región comprendida por la curvatura de Monterrey, donde el temblor más reciente fue el 17/04/2006 (M = 4.3).

Este trabajo representa el primer estudio para entender el riesgo sísmico al que puede estar expuesto el NE de México, a partir de la ocurrencia de grandes terremotos. Para esto se analizó el escenario sísmico, a partir de proponer la de ruptura

la Falla de San Marcos en la porción central de Coahuila (Mw = 6.5). Los valores estimados de PGA en Monterrey, Saltillo y Monclova varían entre 30–70 cm/s<sup>2</sup> para sitios en roca. Por otro lado, este terremoto hipotético podría generar o disparar deslizamientos y caídas de roca en las zonas montañosas. Es necesario desarrollar políticas encaminadas al desarrollo de programas efectivos en la reducción del riesgo sísmico-geológico, que incluyan la estimación de los niveles esperados de la sacudida del terreno ante futuros terremotos, identificar sitios susceptibles a fallar durante el fenómeno natural (grietas, colapsos, hundimientos, deslizamientos, etc.), además de combinar esta información de riesgo con información de la distribución de población, tipo de construcciones para realizar planes de contingencia, así como actualizar los códigos de construcción para una mayor seguridad de la población.

## Resumen

En este trabajo se presentan los resultados del estudio de la sismicidad histórica y la evaluación del riesgo sísmico en el Noreste de México. Como resultado se encontraron un total de 150 eventos sísmicos para el periodo 1455 – 2008, localizados en las siguientes provincias geológicas: Cuencas y Cordilleras y Río Grande *rift*, Sierra Madre Oriental y Planicie Costera del Golfo. Para el área de estudio se encontró, que los terremotos de Parral, Chihuahua de 1928 (Mw = 6.5), Valentine, Texas de 1931 (Mw = 6.5) y Alpine, Texas de 1997 (Mw = 5.7) han sido los más grandes registrados. Aunque, existe evidencia que en abril de 1841 fue sentido un sismo cerca de lo que hoy es la ciudad de Saltillo, Coahuila donde se documentaron daños y colapsos de estructuras, así como la muerte de seis personas. Por otro lado, se propone que para Monterrey, N.L., y el área metropolitana, la ruptura de la falla de San Marcos en la parte central del estado de Coahuila como un sismo de Mw = 6.5, es considerado como un escenario crítico.



**Palabras clave:** Sismicidad histórica, Ecuaciones de atenuación, Noreste de México.

## Abstract

This work constitutes the first attempt to understand the seismic hazard in northeast Mexico. We present a compilation of regional seismicity in northeast Mexico (24-31\_N, 97-106\_W), finding 150 earthquakes during the 1455-2008 year period. In the study area, the major historical earthquakes occurred in Parral, Chihuahua in 1928 ( $M_w = 6.5$ ); Valentine, Texas in 1931 ( $M_w = 6.4$ ); and Alpine, Texas in 1997 ( $M_w = 5.7$ ). A map of Peak ground acceleration (PGA) was computed for a hypothetical earthquake located in central Coahuila. Ground motion values were computed using attenuation relations developed for central and eastern North American provinces. The earthquake in central Coahuila is considered a critical scenario for the main cities of northeast Mexico. The damage associated with this hypothetical earthquake could be severe because most buildings were constructed without seismic criteria. The expected PGA values in Monterrey, Saltillo, and Monclova are between 30 and 70 cm/s<sup>2</sup>. This earthquake might also produce or trigger significant landslides and rock falls in the Sierra Madre Oriental, where several cities are located on the mountain range.

**Keywords:** Historical seismicity, Attenuation relations, Northeast Mexico.

## Referencias

1. Crone, A., De Martini, P., Machette, M., Okumura, K. y Prescott, J. (2003). Paleoseismicity of Two Historically Quiescent Faults in Australia: Implications for Fault Behavior in Stable Continental Regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, 1931-1934.
2. Gupta, H., Rastogi, B., Mohan, I., Rao, C., Sarma, S. y Rao, R. (1998). An investigation into the Latur earthquake of September 29, 1993 in southern India. *Tectonophysics*, 287, 299-313.
3. Natali, S. y Sbar, M. (1982). Sismicity in the epicentral region of the 1887 northeastern Sonora earthquake, México. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72, 181-196.
4. Doser, D. y Rodríguez, J. (1993). The seismicity of Chihuahua, México, and the 1928 Parral earthquake. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 78, 97-104.
5. Doser, D. (1987). The 16 August 1931 Valentine, Texas, earthquake: evidence for normal faulting in west Texas. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77, 2005-2017.
6. Frohlich, C., y Davis, S.D. (2002). *Texas earthquakes*. Springer, 277 pp.
7. Talwani, P. (1999). Fault geometry and earthquakes in continental interiors. *Tectonophysics*, 305, 371-379.
8. Frankel, A.D., Petersen, M.D., Muller, C.S., Haller, K.M., Wheeler, R.L., Leyenkecker, E.V., Wesson, R.L., Harmsen, S.C., Cramer, C.H., Perkins, D.M., y Rukstales, K.S. (2002). Documentation for the 2002 updates of the national seismic hazard maps. UGSG Open-File Report 02-420.
9. Charleston, S. (1981). A summary of the structural geology and tectonics of the state of Coahuila, México. En Schmidt, C. I., Katz, S. B. Eds., *Lower Cretaceous stratigraphy and structure, northern México*. West Texas Geological Society, Field Trip Guidebook, Publication, 81-74, 28-36.
10. Anderson, T. H. y Schmidt, V. A. (1983). The evolution of Middle America and the Gulf of México-Caribbean Sea region during Mesozoic time. *Geological Society of America Bulletin*, 94, 941-966.
11. McKee, J. W., Jones, N. W., y Long, L. E. (1984). History of recurrent activity along a

- major fault in northeastern Mexico. *Geology*, 12, 103-107.
12. McKee, J. W., Jones, N. W., y Long, L. E. (1990). Stratigraphy and provenance of strata along the San Marcos fault, central Coahuila, México. *Geological Society of America Bulletin*, 102, 593-614.
  13. Muehlberger, W. R., Belcher, R. C., y Goetz, L. K. (1978). Quaternary faulting in Trans-Pecos Texas. *Geology*, 6, 337-340.
  14. Chávez-Cabello, G., Aranda-Gómez, J. J., Molina-Garza, R. S., Cossío-Torres, T., Arvizu-Gutiérrez, I. R., y González-Naranjo, G. A. (2007). The San Marcos fault: A Jurassic multireactivated basement structure in northeastern Mexico, en Alaniz-Álvarez, S. A., y Nieto-Samaniego, Á. F., eds., *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México: Geological Society of America Special Paper 422*, 261-286. doi:10.1130/2007.2422(08).
  15. Aranda-Gómez, J. J., Housh, T. B., Luhr, J. F., Henry, C. D., Becker, T. y Chávez-Cabello, G. (2005). Reactivation of the San Marcos fault during mid- to late Tertiary extension, Chihuahua, Mexico, en Anderson, T.H., Nourse, J.A., McKee, J.W., and Steiner, M.B., eds., *The Mojave-Sonora megashear hypothesis: Development, assessment, and alternatives. Geological Society of America Special Paper*, 393, 509-521.
  16. Suter, M. (1991). State of stress and active deformation in Mexico and western Central America, en Slemmons, D.B., Engdahl, E.R., Zoback, M.D., Blackwell, D.D. eds., *Neotectonics of North America: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Decade Map*, 1, 401-421.
  17. Márquez-Azúa, B. y Demets, C. (2003). Crustal velocity field of Mexico from continuous GPS measurements 1992 to June 2001: implications for the neotectonics of México. *Journal of Geophysical Research*, 108 (B9), 2450. doi: 10.1029/2002JB002241.
  18. Galván-Ramírez, I. N. y Montalvo-Arrieta, J. C. (2008). The historical seismicity and prediction of ground motion in northeast Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 25, 37-48.
  19. García-Acosta, V. y Suárez-Reynoso, G. (1996). *Los sismos en la historia de México*. Universidad Autónoma de México, México, 718 pp.
  20. Collins, E.W., compiler (1993). Quaternary fault and fold database of the United States, ver. 1.0: U.S. Geological Survey Open-File report 03-417, <http://qfaults.cr.usgs.gov>.
  21. Collins, E.W., compiler (1994). Quaternary fault and fold database of the United States, ver. 1.0: U.S. Geological Survey Open-File report 03-417, <http://qfaults.cr.usgs.gov>.
  22. De Cserna, Z. (1989). An outline of the geology of México. In: Bally, A.W., Palmer, A.R. (Eds.), *The Geology of North America: An overview, Decade of North American Geology: The Geology of North America, Vol. A. Geological Society of America, Boulder, CO*, 233-264 pp.
  23. Padilla y Sánchez, R. (1982). *Geological Evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo and Monterrey, México*. University of Texas at Austin. Tesis de doctorado.
  24. Padilla y Sánchez, R. (1986). Post-Paleozoic tectonics of northeast Mexico and its role in the evolution of the Gulf of Mexico. *Geofísica Internacional*, 25, 157-206.
  25. Goldhammer, R. (1999). Mesozoic sequence and paleogeographic evolution of Northeast México. *Geological Special of America, Special Paper*, 340, 53 pp.
  26. Eguiluz de Antuñano, S., Aranda-García, M., Marret, R. (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53, 1-26.
  27. Mickus, K. y Montana, C. (1999). Coastal structure of northern México revealed through the analysis of gravity data, in

- Bartolini C., Willson J.L., y Lawton T.F. Eds., Mesozoic sedimentary and tectonic history of north-central México: Boulder, Colorado. Geological Society of America Special Paper, 340, 357-371.
28. Zhou, Y., Murphy, M. A., y Hamade, A. (2006). Structural development of the Peregrina-Huizachal anticlinorium, Mexico. *Journal of Structural Geology*, 28, 494-507.
  29. Ortiz-Urbilla, A., y Tolson, G. (2004). Interpretación estructural de una sección sísmica en la región Arcabuz-Culebra de la Cuenca de Burgos, NE de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21, 226-235.
  30. Montalvo Arrieta, J. C., de León Gómez, H., y Valdés González, C. (2006). LNIG: Nueva estación sísmica digital en el noreste de México. *Ingenierías*, IX, 17-24.
  31. Doser, D. I., Baker, M. R., y Mason, D. B. (1991). Seismicity in the War-Wink gas field, Delaware basin, west Texas, and its relationships to petroleum production. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81, 971-986.
  32. Doser, D. I., Baker, M. R., Luo, M., Marroquín, P., Ballesteros, L., Kingwell, J., Díaz, H.L., y Kaip, G. (1992). The not so simple relationship between seismicity and oil production in the Permian basin, west Texas. *Pure and Applied Geophysics*, 139, 481-506.
  33. Davis, S. D., Nyffenegger, P. A., y Frohlich, C., (1995). The 9 April 1993 earthquake in South-Central Texas: was it induced by fluid withdrawal? *Bulletin of the Seismological Society of America* 85, 1888-1895.
  34. Toro, G. R., Abrahmson, N. A., y Schneider, J. F. (1997). Model of strong ground motion from earthquakes in central and eastern North America: Best estimates and uncertainties. *Seismological Research Letters*, 68, 41-57.
  35. Cornell, C. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1583-1606.
  36. Lin, A., Guo, J., Kano, K., y Awata, Y. (2006). Average Slip Rate and Recurrence Interval of Large-Magnitude Earthquakes on the Western Segment of the Strike-Slip Kunlun Fault, Northern Tibet. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 1597-1611.

*Recibido: 16 de agosto de 2009*

*Aceptado: 10 de septiembre de 2009*